

УДК 53, 63  
EDN: LYBVBI

PACS: 52.80.Hc

**Воздействие плазмы коронного разряда  
на окислительно-восстановительные процессы в почве**

© В. Л. Бычков\*, А. П. Шваров, А. А. Логунов, Д. В. Бычков, Д. Н. Ваулин

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия**\* E-mail: bychvl@gmail.com**Статья поступила в редакцию 12.05.2025; после доработки 6.06.2025; принята к публикации 20.10.2025**Шифр научной специальности: 1.3.9*

*Проведены исследования влияния плазмы коронного разряда на окислительно-восстановительные реакции почвы, а именно на образцы низинного торфа (капиллярно насыщенного водой) и чистого кварцевого песка (воздушно сухого) в чистом виде и в смесях при разном соотношении торфа и песка. Параметры разряда: время действия до 60 мин, напряжение на разряде  $U = 10\text{--}20$  кВ, ток в разряде  $I = 20\text{--}100$  мкА. Максимальный эффект обработки коронным разрядом образцов был получен в отношении окислительно-восстановительного потенциала. Процесс окисления органического вещества идет под влиянием озона и отрицательных ионов, образующихся в плазме коронного разряда. Эффективность воздействия отрицательной короны в 2–5 раз выше, чем положительной, что связано с более эффективной наработкой отрицательных ионов.*

*Ключевые слова:* коронный разряд; окислительно-восстановительные реакции почвы; низинный торф; чистый кварцевый песок.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-5-51-56

**Введение**

Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) для характеристики состояния почвы (увлажнения, величины pH, растворимых соединений и др.) широко применяется в научных исследованиях [1–6]. ОВП почв чрезвычайно чутко реагирует на изменение условий почвообразования, на мелиоративные мероприятия и агротехнику. Например, известкование кислых почв, вспашка, сооружение открытых дрен вызывает значительное увеличение уровня ОВП в почвах. Наоборот, прикатывание почв, травосеяние, внесение органических удобрений снижают ОВП. Благодаря существованию в почвенных горизонтах тех или иных окислительно-восстановительных систем пара электродов, погруженная в почвенную толщу или выделенный почвенный раствор, дает разность потенциалов, величина которой зависит от концентрации и

соотношения окислителей и восстановителей, образующихся в процессе почвообразования. Эта разность потенциалов является удобным суммарным показателем окислительно-восстановительного потенциала данного горизонта или раствора в милливольтках. ОВП указывает на уровень активности прохождения реакций в рамках которых осуществляется передача либо присоединение электронов [1,6]. В общем виде реакцию окисления-восстановления можно представить так [1]:  $Ox + ne \rightarrow Red$ , где  $Ox$  – окислитель;  $n$  – число электронов, участвующих в реакции;  $e$  – электроны;  $Red$  – восстановитель. Одни вещества теряют электроны и окисляются (реакция окисления), другие приобретают электроны и восстанавливаются (реакция восстановления). Большинство реакций окисления органических веществ необратимы.

Научный интерес представляет использование холодной плазмы коронного разряда

для стимуляции ОВП, как фактора развития почв во времени под воздействием искусственных условий. Данное исследование является продолжением цикла наших исследований, посвященных воздействию плазмы коронного разряда на биологические объекты [8, 9]. Большой интерес представляет синергизм воздействия холодной плазмы на растения и почву. Эти вопросы становятся актуальными при изучении возможности создания областей человеческой жизнедеятельности в экстремальных условиях. В связи с этим одной из целей данной работы было проведение экспериментов по оценке воздействия коронного разряда на ОВП в почве.

### Объекты исследования

Объектом исследования послужили образцы низинного торфа (капиллярно насыщенного водой) и чистого кварцевого песка (воздушно сухого) в чистом виде и в смесях при разном соотношении торфа и песка.

Характеристика объектов исследования.

1. Торф. Тип торфа – низинный. Вид торфа – тростниковый. Степень разложения торфа 45,0 %. Ботанический состав образца торфа: тростник – 50–55 %, древесина лиственных деревьев – 15 %, кора сосны – 5 %, кора березы – 5 %, вахта – 5 %, хвощ – 5 %, неизвестные травянистые остатки – 10 %.

2. Смеси торф + песок кварцевый среднезернистый:

2.1. Чистый торф 100 % по массе образца зольность 10,5 % (89,5 % органическое вещество, 10,5 % минеральная часть).

2.2. Торф + песок (78,6 + 21,4) % по массе образца (70,3 % органическое вещество, 29,7 % минеральная часть).

2.3. Торф + песок (50 + 50) % по массе образца (44,25 % органическое вещество, 55,75 % минеральная часть).

2.4. Торф + песок (21,4 + 78,6) % по массе образца (19,2 % органическое вещество, 80,8 % минеральная часть).

2.5. Чистый песок кварцевый среднезернистый 100 % (100 % минеральная часть).

### Методы исследования и экспериментальная установка

Образцы массой 70 грамм подвергались обработке плазмой коронного разряда –

отрицательной и положительной короной ( $U = 10\text{--}20$  кВ,  $I = 20\text{--}100$  мкА) в течение 60 минут. Выбор коронного разряда был сделан на основе данных о плазме воздуха богатой ионами и известными свойствами коронного разряда, которые в практике используется для получения озона [10]. После обработки образцы доводились до пастообразного состояния, в котором определялся параметр удельной электрической проводимости. Другая часть образцов помещалась в колбы с добавлением дистиллированной воды в соотношении почва-вода = 1:5. Производилось взбалтывание в течение 10 минут и фильтрация суспензии через бумажный фильтр. В отфильтрованных образцах водной вытяжки из почв определялись параметры удельной электропроводности и величины ОВП. Величину ОВП определяли в водной вытяжке (1:5) из образцов в эксперименте анализатором ORP. Электропроводность почвенных паст определяли прибором Land Mapper [7].

Схема экспериментального устройства для обработки образцов почвы коронным разрядом представлена в работах [8, 9]. Установка состоит из кюветы, наполненной почвенными образцами, и электрической цепи. Верхний электрод представлял собой мультиигольчатую систему (29 игл) с радиусом кончика игл 0,4 мм. Иглы были помещены на высоте 5–15 мм над поверхностью образцов. Кюветы были выполнены из металла или диэлектрика. Ток в разряде измерялся миллиамперметром, напряжение измерялось цепью, состоящей из сопротивления  $R_1$  и миллиамперметра. Были измерены вольт-амперные характеристики разряда над поверхностью почвы.

Время дрейфа  $t$  образованных ионов в электрическом поле коронного разряда порядка [11]  $t = x/v = 5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-6}$  с, где  $x$  – расстояние от иголки электрода до поверхности почвы (5–7 мм),  $v = 10^5\text{--}10^6$  см/с – скорость дрейфа ионов. Оно много меньше типичного времени обработки почвы. Образованные в плазме воздуха активные частицы при действии диффузии быстро двигаются к поверхности почвы. Характерное время диффузии  $t_D$  равно [12],  $t_D = x^2/D$ , где  $D$  – коэффициент диффузии ионов (типичный коэффициент диффузии ионов  $O_2^-$  в кислороде  $0,83$  см<sup>2</sup>/с,  $O_3^-$  в кислороде  $0,056$  см<sup>2</sup>/с, атомов  $N_2-O_2$  –  $0,182$  см<sup>2</sup>/с.) Характерное время диффузии об-

разованных в плазме частиц к поверхности почвы находится в диапазоне 0,3–1 с, что также много меньше времени обработки почвы плазмой коронного разряда. Поэтому можно считать, что образование активных частиц в воздухе коронным разрядом, которые влияют на ОВП в почве, является важным фактором воздействия плазмы.

### Результаты экспериментов с отрицательной короной

В таблице 1 представлены параметры разряда отрицательной короны.

В таблице 2 представлены удельные электропроводности почвенной пасты.

Органогенный образец показывает максимальную удельную электропроводность, равную 1174 мкСм/см. С увеличением мине-

ральной составляющей образцов электропроводность уменьшается. В чистом песке она минимальна и составляет 68 мкСм/см.

Обработка образцов коронным разрядом приводит к росту удельной электропроводности (табл. 2). С уменьшением доли органической составляющей в образцах снижается влияние обработки на электропроводность. Также влияние обработки образцов на рост электропроводности было зафиксировано в чистом песке.

В таблице 3 представлены результаты по измерению окислительно-восстановительного потенциала и удельной электропроводности водной вытяжки.

Аналогичная закономерность влияние обработки образцов коронным разрядом была отмечена при измерении электропроводности водной вытяжки (табл. 3).

Таблица 1

*Параметры разряда отрицательной короны*

Образец	Средний ток, мкА	Среднее напряжение, кВ	Средняя энергия, Дж
Торф 100 %	39	7,5	108
Торф + песок 78,6 + 21,4	107	8,6	331
Торф + песок 50 + 50	160	7,7	444
Торф + песок 21,6 + 78,6	146	10,4	547
Песок 100 %	210	7,3	551

Таблица 2

*Удельная электропроводность почвенной пасты*

Образец	ЕС контроль (без обработки), мкСм/см	ЕС обработка, мкСм/см	ΔЕС, мкСм/см (по сравнению с контролем)
Торф 100 %	1174	1300	126
Торф + песок 78,6 + 21,4	972	1055	83
Торф + песок 50 + 50	605	750	55
Торф + песок 21,6 + 78,6	450	485	35
Песок 100 %	68	120	52

Таблица 3

*ОВП и удельная электропроводность водной вытяжки*

Образец	Электропроводность мкСм/см		ОВП, мВ	
	Контроль	Обработка	Контроль	Обработка
Торф 100 %	465	544	+38	+815
Торф + песок 78,6 + 21,4	360	390	+65	+665
Торф + песок 50 + 50	270	340	+72	+94
Торф + песок 21,6 + 78,4	95	166	+81	+98
Песок 100 %	27	44	+94	+105

Более значительный эффект обработки коронным разрядом образцов был получен в отношении показателя окислительно-восстановительных условий. Во всех контрольных образцах этот показатель составлял от +38 мВ на чистом торфе и +94 мВ на чистом песке. Эти величины ОВП свидетельствуют о преобладании восстановительных условий, что характерно с точки зрения генезиса объектов. Торф является гидроморфным образованием в генезисе которого доминируют восстановительные процессы.

Эффект обработки образцов отрицательным коронным разрядом в отношении показателя ОВП был очень значительным. Процесс окисления органического вещества идет ускоренно под влиянием нескольких факторов. Главным окисляющим фактором является действие озона и отрицательных ионов, которые образуются в газовой фазе воздуха при воздействии коронного разряда на воздух с образованием отрицательных ионов и озона в воздухе.

### Эксперимент с положительной короной

В таблице 4 представлены параметры разряда положительной короны.

Из таблицы 4 видно, что условия воздействия сильно менялись. По-видимому, на результаты измерений сильно влияла величина влажности в лаборатории или происходила неполная гомогенизация (перемешивание) смеси торфа и песка.

В таблице 5 представлены результаты, полученные по удельной электропроводности почвенной пасты и ОВП образцов, обработанных положительной короной.

ОВП варианта торф + песок 21,4 + 78,6 % выше значения торф + песок 50 + 50 %. Но это не ошибка измерения, а показатель неполной гомогенизации (перемешивания) смеси торфа и песка.

ОВП в случае положительной короны оказывается значительно меньшим, чем в случае с отрицательной короной. Это показывает большую перспективность применения именно отрицательной короны при активации почвы.

Таблица 4

*Параметры разряда положительной короны*

Образец	Средний ток, мкА	Среднее напряжение, кВ	Средняя энергия, Дж
Торф 100 %	6,3	4,0	9,1
Торф + песок 78,6 + 21,4 %	3,1	13,0	14,5
Торф + песок 50 + 50 %	76	2,5	68
Торф + песок 21,4 + 78,6 %	216	3,9	303
Песок 100 %	12,8	10,4	48

Таблица 5

*ОВП почвенной пасты и удельная электропроводность образцов, обработанных положительной короной*

Образец	ОВП, мВольт	ЕС водной вытяжки, мкСм/см	ЕС пасты, мкСм/см
Торф 100 %	+156	1195	1698
Торф + песок 78,6 + 21,4 %	+110	893	1336
Торф + песок 50 + 50 %	+70	574	923
Торф + песок 21,4 + 78,6 %	+105	282	622
Песок 100 %	+45	75	136

### Заключение

При обработке коронным разрядом почвы получен значительный эффект в отношении показателя окислительно-восстановительных условий, что является положительным фактором при анализе воздействия разряда на почву. Во всех контрольных образцах этот показатель составлял от +38 мВ на чистом торфе и +94 мВ на чистом песке. Эти величины ОВП свидетельствуют о преобладании восстановительных условий. Торф является гидроморфным образованием, в генезисе которого доминируют восстановительные процессы. Эффект в отношении показателя ОВП оказался очень значительным поскольку процесс окисления органического вещества идет ускоренно под влиянием нескольких факторов, реализующихся в плазме коронного разряда.

Сравнение эффективности действия положительной и отрицательной корон показывает на более высокую эффективность отрицательной короны. Это может быть связано с наработкой отрицательных ионов  $[10] O^-$ ,  $O_2^-$ , приводящих к дополнительной наработке атомарного кислорода и последующего образования озона. Такой канал отсутствует при воздействии положительной короны на воздух.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов Д. С., Садовникова Л. К., Суханова Н. И. Химия почв. – М.: Высшая школа, 2005.
2. Цанко Ю. Л., Зубковская В. В., Огородняя А. И. / Почвоведение-агрохимия. 2017. № 1. С. 78–79.
3. McKenzie L. J., Whiteside E. P., Erickson A. E. / Soil Sci. Soc. Am. J. 1960. Vol. 24. P. 300–301.
4. Yu K., Patrick W. H. / Soil Sci. Soc. Am. J. 2003. Vol. 67. P. 1952. doi: 10.2136/sssaj2003.1952.
5. Bohn H. L. / Soil Sci. 1971. Vol. 112. P. 1–2.
6. Hunting E. R., Harrison R. G., Bruder A., van Bodegom P. M. et al. / Front. Physiol. 2019. Vol. 10. P. 1, D.
7. Поздняков А. И. / Почвоведение. 2008. № 10. С. 1188.
8. Бычков В. Л., Горячкин П. А., Черников В. А., Шваров А. П., Изотов А. М., Тарасенко Б. А., Дударев Д. П. / Прикладная физика. 2023. № 2. С. 15.
9. Бычков В. Л., Горячкин П. А., Ваулин Д. Н., Шваров А. П., Изотов А. М., Тарасенко Б. А., Дударев Д. П. / Прикладная физика. 2024. № 1. С. 13.
10. Лунин В. В., Самойлович В. Г., Ткаченко С. Н., Ткаченко И. С. Теория и практика получения и применения озона. – М.: Изд-во Московского университета, 2023.
11. Смирнов Б. М. Физика слабоионизованного газа. – М.: Наука, 1985.
12. Mc Daniel R. W., Mason E. A. The mobility and diffusion of ions in gases. – New-York-London-Sydney-Toronto: John Wiley and Sons, 1973.

PACS: 52.80.Hc

## Effect of corona discharge plasma on redox processes in soil

V. L. Bychkov\*, A. P. Shvarov, A. A. Logunov, D. V. Bychkov and D. N. Vaulin

Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

\* E-mail: bychvl@gmail.com

Received 12.05.2025; revised 6.06.2025; accepted 20.10.2025

*Studies have been conducted on the effect of corona discharge plasma on redox reactions of the soil, namely on samples of lowland peat (capillary saturated with water) and pure quartz sand (air-dry) in pure form and in mixtures with different ratios of peat and sand. Discharge parameters: duration up to 60 minutes, discharge voltage  $U = 10\text{--}20$  kV, discharge current  $I = 20\text{--}100$  microA. A maximum effect of the corona discharge treatment of the samples has been obtained in relation to the redox potential. The process of oxidation of organic matter is under the influence of ozone and negative ions in the plasma of the corona discharge. The effectiveness of the negative corona is 2–5 times higher than of the positive one and is connected with more effective production of negative ions.*

*Keywords:* corona discharge; redox reactions of soil; lowland peat; pure quartz sand.

## REFERENCES

1. Orlov D. S., Sadovnikova L. K. and Sukhanova N. I. Chemistry of soils. Moscow, Vysshaya shkola, 2005 [in Russian].
2. Tsapko Y. L., Zubkovskaya V. V. and Ogorodnaya A. I., Pochvovedenie – agrokimiya, № 1, 78 (2017) [in Russian].
3. McKenzie L. J., Whiteside E. P. and Erickson A. E., Soil Sci. Soc. Am. J **24**, 300 (1960).
4. Yu K. and Patrick W. H., Soil Sci. Soc. Am. J **67**, 1952 (2003). doi: 10.2136/sssaj2003.1952.
5. Bohn H. L., Soil Sci. **112**, 1 (1971).
6. Hunting E. R., Harrison R. G., Bruder A., van Bodegom P. M. et al., Front. Physiol. **10**, 1, D (2019).
7. Pozdnyakov A. I., Pochvovedeniye, № 10, 1188 (2008).
8. Bychkov V. L., Goryachkin P. A., Chernikov V. A., Shvarov A. P., Izotov A. M., Tarasenko B. A. and Dudarev D. P., Applied Physics, № 2, 15 (2023) [in Russian].
9. Bychkov V. L., Goryachkin P. A., Vaulin D. N., Shvarov A. P., Izotov A. M., Tarasenko B. A. and Dudarev D. P., Applied Physics, № 1, 13 (2024) [in Russian].
10. Lunin V. V., Samoilovich V. G., Tkachenko S. N. and Tkachenko I. S. Theory and practice of ozone obtaining and application. Moscow, Moscow university publishers, 2023 [in Russian].
11. Smirnov B. M. Physics of low ionized gas. Moscow, Nauka publishers, 1985 [in Russian].
12. McDaniel R. W. and Mason E. A. The mobility and diffusion of ions in gases. New-York- London- Sydney-Toronto, John Wiley and Sons, 1973.

## Об авторах

**Бычков Владимир Львович**, д.ф.-м.н. ведущий научный сотрудник, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: bychvl@gmail.com SPIN-код: 2936-1116, AuthorID: 18266

**Шваров Александр Петрович**, к.б.н., доцент, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: ashvarov@mail.ru SPIN-код: 5431-8919, AuthorID: 91766

**Логунов Александр Александрович**, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). SPIN-код: 8069-9474, AuthorID: 244088

**Бычков Дмитрий Владимирович**, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). AuthorID: 611220

**Ваулин Дмитрий Николаевич**, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2).